

## مروری بر خواص مکانیکی و دوام روسازی بتن غلتکی (RCCP)

### مقاله علمی - پژوهشی

محمود عامری، استاد، دانشکده عمران، گروه راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
ندا کامبوزیا\*، استادیار، دانشکده عمران، گروه راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
محمد رضا خاکباز، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، گروه راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: nkamboozia@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۱۶۹-۱۹۲

### چکیده

بتن غلتکی نوعی بتن با اسلامپ صفر است که مواد و مصالح آن همانند بتن معمولی می باشد. استفاده از بتن غلتکی در چند دهه اخیر به ویژه برای استفاده در روسازی افزایش یافته است. استفاده از بتن غلتکی در ساخت روسازی ها هزینه ساخت کمتری دارد و در مقایسه با روسازی آسفالتی معمولی، سرعت اجرای بیشتری دارد. این نوع روسازی به طور گسترده در مناطقی که بارهای سنگین را با سرعت کم متحمل می شوند، کاربرد بیشتری دارد. از سوی دیگر، در سال های اخیر استفاده از بتن غلتکی در بزرگراه ها و خیابان های درون شهری نیز افزایش یافته است. روسازی بتن غلتکی دارای مزیت رقابتی نسبت به روسازی های آسفالتی با کارایی بالا از نظر مقاومت فشاری بالا، دوام مناسب، هزینه تعمیر و نگهداری پایین و عمر طولانی تر است. در این مقاله در ابتدا به مواد و مصالح مورد نظر در ساخت بتن غلتکی شامل مواد سیمانی، مصالح سنگی، آب و در نهایت روش طرح اختلاط پرداخته شده است. سپس به بررسی خواص بتن غلتکی با تمرکز بر روسازی بتن غلتکی شامل خواص مکانیکی، مدول الاستیسیته، رفتار خستگی و خزش، تغییر حجم، خواص حرارتی، نفوذپذیری و جذب آب، سایش، دوام روسازی در چرخه ذوب و یخندان و خواص سطحی روسازی بتن غلتکی پرداخته شده است. هدف از این مقاله، شناخت ویژگی های مختلف بتن غلتکی و تحقیقات صورت گرفته در طرح مخلوط جهت دستیابی به مخلوط با استحکام و دوام بیشتر است.

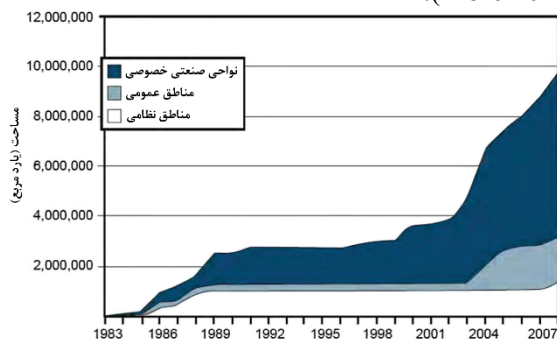
واژه های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، ویژگی های مکانیکی، دوام روسازی

### ۱- مقدمه

شده با بتن غلتکی در آمریکای شمالی پروژه ای در جاده یاکیما-واشنگتن است که در سال ۱۹۴۲ میلادی توسط بخش سیاتل از مهندسين ارتش ایالات متحده ساخته شد. البته گزارش هایی نشان می دهد که نمونه مشابهی از روسازی بتن غلتکی در سال ۱۹۳۰ میلادی در سوئد تولید شده است (Anderson, 1986). برای اولین بار در سال ۱۹۷۶ میلادی،

ساخت روسازی بتن غلتکی روشی جدید برای توسعه و تکامل مصالحی مانند خاک تثبیت شده با سیمان یا اساس سیمانی است که از دیرباز به عنوان اساس و زیراساس برای طراحی و ساخت روسازی استفاده می شده است. چنین استفاده هایی در بسیاری از کشورها قبل از جنگ جهانی اول انجام شده است (Carrascón, Díaz, and Josa, 1990). اولین جاده ساخته

مربع بتن غلتکی ساخته شد (Kagata, 1998). مجموع بیشترین پروژه‌های روسازی بتن غلتکی که تا به امروز انجام شده است شامل بیش از ۵۴۳۶۶۴ متر مربع روسازی با ضخامت ۲۰۳ الی ۲۵۴ میلی‌متر است که در کارخانه خودروسازی جنرال موتور و ۳۶۰۰۰۰ متر مربع روسازی بتن غلتکی با ضخامت ۲۵۴ میلی‌متر در نیویورک است. هر دو مورد در سال‌های ۱۹۸۸-۱۹۸۹ میلادی ساخته شدند و به عنوان پارکینگ و جاده مورد استفاده قرار گرفتند (ACI 325.10R-99, 2004). تنها نمونه بتن غلتکی که برای ساخت روسازی فرودگاه مورد استفاده قرار گرفت، فرودگاه بین‌المللی پورتلند در سال ۱۹۸۵ بود (Abrams & Jackshaw, 1987؛ Abrams, 1986). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در آمریکای شمالی استفاده از بتن غلتکی برای کاربرد روسازی بتن غلتکی در دهه‌های گذشته به ویژه در ساخت جاده‌ها و پارکینگ‌های کم حجم به طور قابل توجهی گسترش یافته است (Khayat and Libre 2014).



شکل ۱. کاربردهای روسازی بتن غلتکی در آمریکای شمالی (Khayat and Libre 2014)

بتن به طور کلی به عنوان یک مصالح ساختمانی مرکب که عمدتاً از سنگدانه، سیمان و آب تشکیل شده است، تعریف می‌شود (Zulkifli et al. 2015). بتن غلتکی نوعی بتن است که توسط غلتک متراکم می‌شود و اسلامپ آن صفر است. مخلوط تولید شده توسط کامیون به محل اجرای پروژه حمل می‌شود و توسط دستگاه فینیشر بر روی لایه زیرین پخش می‌شود و سپس با غلتک‌ها متراکم می‌شود. دلیل نامگذاری این نوع بتن به نام بتن غلتکی، استفاده از غلتک برای تراکم آن است (Tayabji et al. 1995؛ ACI 207.5R-99. 2004). مؤسسه بتن آمریکا بتن

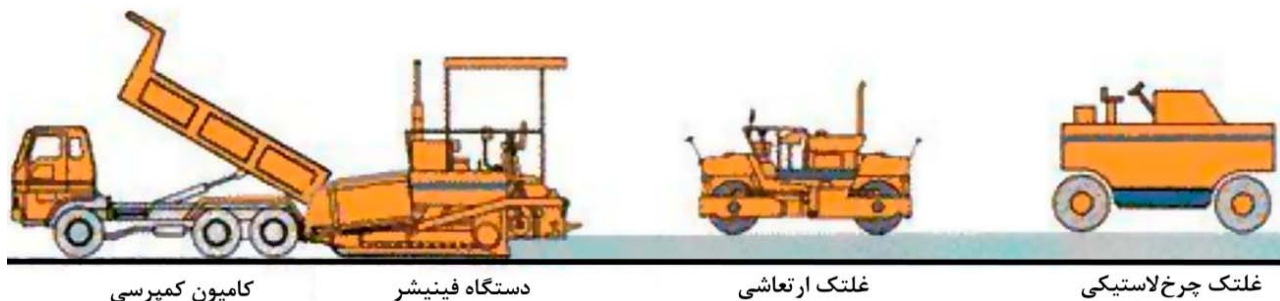
روسازی بتنی غلتکی در جزیره ونکوور، بریتیش کلمبیا و کانادا برای ساختن یک طبقه برای ذخیره‌سازی و انبارش تنه درختان مورد استفاده قرار گرفت.

در طول دوره ۱۹۷۶-۱۹۷۸ میلادی در ونکوور، سه محوطه مشابه دیگر از روسازی بتن غلتکی در جزایر کوئین شارلوت ساخته شد. در اوایل دهه ۱۹۸۰، مهندسان ارتش ایالات متحده مطالعه استفاده از بتن فشرده غلتکی را در ساخت تأسیسات نظامی آغاز کردند. بدین منظور در سال ۱۹۸۳ جاده‌ای به ضخامت ۲۲۹ الی ۳۳۰ میلی‌متر و ۳۹۲ متر مربع و همچنین جاده‌ای برای عبور مخزن به ضخامت ۲۵۴ الی ۳۳۰ میلی‌متر و ۴۹۳ متر مربع با استفاده از بتن غلتکی ساخته شد (ACI 325.10R-99, 2004). در سال ۱۹۸۴ میلادی، مهندسان ارتش ایالات متحده به منظور بررسی دوام بتن غلتکی در برابر یخ-ذوب،

در آزمایشگاه تحقیقاتی مناطق سرد که در هانوفر واقع شده بود، یک جاده در مقیاس کامل را با استفاده از آن ساخته و ارزیابی کردند. نتایج این آزمایش رضایت‌بخش بود و استفاده از روسازی بتن غلتکی مورد تایید قرار گرفت (McCormick Jr, 1985). در سال ۱۹۸۴ میلادی، مهندسان ارتش ایالات متحده اولین جاده در مقیاس کامل را با استفاده از بتن غلتکی که برای پارکینگ تجهیزات نظامی در تگزاس استفاده می‌شد، ساختند (Holder, 1984). در اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی، با گسترش صنعت چوب و معادن، تمایل به استفاده از روسازی بتن غلتکی در صنایع سنگین افزایش یافت. در سال ۱۹۸۵، راه‌آهن شمالی برلینگتون از بتن غلتکی برای ساختن روسازی یک منطقه ۴۴۳۱۳ متر مربعی در تگزاس استفاده کرد (Logie & Oliverson, 1987). در سال ۱۹۸۶ میلادی، راه‌آهن این منطقه جهت احداث کف انبار از روسازی بتن غلتکی به مساحت ۱۰۷۰۲۱ متر مربع استفاده نمود. در سال ۱۹۸۵ میلادی، مهندسان ارتش ایالات متحده با استفاده از بتن غلتکی در واشنگتن دو منطقه وسیع جاده‌ای به مساحت ۶٫۹ هکتار را اجرا کردند (Larson a & b, 1986). بین سال‌های ۱۹۸۶ و ۱۹۸۸ میلادی، بتن غلتکی در ساخت دو پایانه در بوستون استفاده شد (Huang, 2004). سال ۱۹۸۷ میلادی، اولین بار بتن غلتکی در ژاپن مورد بهره برداری قرار گرفت. این فرآیند تا سال ۱۹۹۷ میلادی ادامه یافت و حدود ۱۸۰۰۰۰۰ متر

سایر کشورها برقرار است، مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر با ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود (Barati & Karimi & Sahaf, 2022). مواد تشکیل‌دهنده بتن غلتکی در یک کارخانه اختلاط بتن، همانند یک توده ناهمگن که قوام شبیه به شن مرطوب و یا بتن با اسلامپ صفر دارد، مخلوط می‌شوند و در لایه‌هایی با ضخامت متراکم ۱۰ اینچ (۲۵۴ میلی‌متر)، معمولاً توسط دستگاه فینیشر روسازی بتنی در سطح راه پخش می‌شوند (Cortez, 1992). همچنین زمان حمل کامیون به خصوص در هوای گرم باید تنظیم شود؛ زیرا زمانی که دمای هوا کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد است، زمان بین پایان اختلاط و تکمیل تراکم غلتکی نباید از ۴۵ دقیقه تجاوز کند و زمانی که دمای هوا مساوی یا بیشتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد باشد، نباید از ۳۰ دقیقه تجاوز کند (Shin and Carboneau, 2010). شکل ۲ ماشین آلات و تجهیزات مورد استفاده برای اجرای روسازی بتن غلتکی را نشان می‌دهد.

غلتکی را به عنوان "بتن متراکم شده توسط غلتک" تعریف می‌کند. بتن غلتکی سخت شده می‌تواند مشابه با بتن‌های معمولی باشد. همچنین بتن غلتکی ضمن عدم تفاوت قابل توجه نسبت به بتن معمولی، سخت‌شدگی بالاتری را ایجاد کند. اصطلاح تراکم غلتکی نیز توسط موسسه بتن آمریکا به عنوان فرآیندی برای تراکم بتن با استفاده از یک غلتک غالباً ارتعاشی تعریف شده است. بتن غلتکی در دو بخش کلی ساخت سد و روسازی‌ها استفاده می‌شود. در سدهای ساخته شده با بتنی غلتکی، معمولاً مقادیر زیادی بتن برای تشکیل یک سازه بتنی توده‌ای یکپارچه قرار می‌گیرد (Malkawi, Mutasher, and Qiu, 2003). روسازی بتن غلتکی یک مخلوط نسبتاً سفت از سنگدانه (حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها معمولاً ۱۹ میلی‌متر)، مواد سیمانی و آب است که توسط غلتک‌های ارتعاشی متراکم می‌گردد. هنگامی که بتن غلتکی به عنوان یک سطح روسازی استفاده می‌شود، حداقل مقاومت فشاری آن برابر با ۲۷/۶ مگاپاسکال می‌باشد. در کشور سوئد با الزامات بارگذاری و شرایط جوی شدیدتری نسبت به



شکل ۲. ماشین آلات و تجهیزات مورد استفاده برای روسازی بتن غلتکی (Aghaeipour and Madhkhani, 2020)

## ۲-۱- مزایا و معایب بتن غلتکی

می‌تواند به سرعت اجرا شود (ACI 207.5R-99., 2004). بر خلاف بتن معمولی، بتن غلتکی یک مخلوط نیمه‌خشک است که با نسبت آب به سیمان کمتر، اما با محتوای سیمان یکسان با بتن معمولی ساخته می‌شود (Zdiri et al., 2009). این سختی اولیه باعث می‌شود که در فرآیند تراکم روسازی‌های بتن غلتکی از تقویت‌کننده فولادی یا قالب استفاده نشود. این موضوع همچنین باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در مقایسه با هزینه اجرای روسازی‌های بتنی معمولی می‌شود (Tayabji et al., 1995). همانطور که اشاره گردید، بتن غلتکی بطور کلی در

بتن غلتکی برای سال‌ها در کاربردهای مختلفی از جمله سدها، محوطه‌های ذخیره‌سازی الوار، جاده‌های حمل و نقل مختص بارهای سنگین، اسکله‌های بارگیری، ترمینال‌های بار و بندگاه‌ها، پارکینگ‌ها و محوطه‌های ابتدا و انتهای باند فرود و پرواز و باند خزش فرودگاه‌ها استفاده می‌شود. اخیراً مخلوط‌های بتن غلتکی در کاربردهای جاده‌ای، از جمله خیابان‌های شهری، بزرگراه‌ها و شانهای جاده‌ها رایج شده‌اند (Williams, 2014). مزیت اصلی استفاده از این نوع روسازی، کاهش هزینه و کاهش زمان ساخت است. یکی دیگر از مزایای بتن غلتکی این است که این فناوری

سرعت اجرای بالای این روسازی در مقایسه با دیگر روسازی‌های بتنی و در نتیجه کاهش هزینه‌های اجرایی آن، عدم نیاز به فولاد مسلح‌کننده و آرماتورهای دوخت، سازگاری بیشتر این روسازی با طبیعت و در نتیجه آلودگی کمتر محیط‌زیست و توجه به مسائل توسعه پایدار، عدم شکل‌پذیری تحت اثر بارهای سنگین متمرکز در مقایسه با روسازی بتن آسفالتی و امکان استفاده بر روی بسترهای ضعیف مقاومتی نام برد. همچنان که استفاده از بتن غلتکی در روسازی دارای مزایای بسیاری می‌باشد، استفاده از آن در این زمینه مشکلات و معایبی نیز به همراه دارد که پیش از انتخاب، بایستی مورد توجه قرار گیرند. از جمله این معایب می‌توان به نیاز بیشتر به نیروهای متخصص جهت اجرا، نبود ماشین‌آلات تخصصی این روسازی در کشورهایی از جمله ایران، افزایش هزینه اولیه ساخت روسازی بتنی در مقایسه با روسازی آسفالتی، وجود درزها به عنوان یکی از نقاط ضعف رویه‌های بتنی، بروز پدیده پامپینگ<sup>۲</sup> و خارج شدن مصالح ریزدانه از محل درزهای انبساط، کمبود اطلاعات مربوط به عملکرد طولانی‌مدت این روسازی، نیاز به اجرا و کنترل دقیق هنگام ساخت با توجه به حساسیت عملکرد روسازی به تغییرات رطوبت جهت حصول تراکم کافی و سختی تسطیح نمودن سطح روسازی و دشواری بدست‌آوردن بافت سطحی مناسب جهت جلوگیری از لغزش وسایل نقلیه در راه‌های با ترافیک سنگین اشاره نمود (Barati & Karimi & Sahaf, 2022).

در این مقاله سعی شده در ابتدا به مواد و مصالحی که در بتن غلتکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اشاره شود. این بخش شامل مواد سیمانی، مصالح سنگی و آب و موارد اشاره شده در استانداردها برای طرح اختلاط می‌شود. سپس به بررسی خواص بتن غلتکی با تمرکز بر روسازی بتن غلتکی شامل خواص مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی)، مدول الاستیسیته، رفتار خستگی و خزش، تغییر حجم (شامل انقباض ناشی از خشک‌شدگی و تغییر حجم خود به خودی)، خواص حرارتی، نفوذپذیری و جذب آب، سایش، دوام روسازی در چرخه ذوب و یخبندان و خواص سطحی روسازی بتن غلتکی پرداخته می‌گردد. هدف نهایی این مقاله، شناخت ویژگی‌های فنی بتن غلتکی در ساخت روسازی راه‌ها و مزایا و معایب آن‌ها است. همچنین شناخت از این موضوع که استفاده از مواد افزودنی و

سدسازی و روسازی استفاده می‌گردد. تفاوت‌هایی در مشخصات بتن غلتکی در روسازی و سدسازی وجود دارد. این تفاوت‌ها منجر به مشخصاتی می‌شوند که از آن انتظار می‌رود. به عنوان مثال از بتن غلتکی سدسازی انتظار مقاومت بالای فشاری ۲۸ روزه نمی‌رود، اما در روسازی راه چنین انتظاری از بتن در این سن می‌رود. همچنین حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها در بتن غلتکی که در روسازی‌ها استفاده می‌شود، بایستی به ۱۹ میلی‌متر محدود شود تا در اجرای روسازی با ضخامت کمتر، سطحی نسبتاً صاف و هموار ایجاد شود (Barati & Karimi & Sahaf, 2022).

جدول ۱. مقایسه مشخصات بتن غلتکی روسازی و سدسازی

(Barati & Karimi & Sahaf, 2022)

مشخصات	سدسازی	روسازی
مقدار سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۵۰-۶۰	۳۵۰-۲۱۰
نسبت آب به سیمان	۰/۸ تا ۰/۴	۰/۴۵ تا ۰/۳
حداکثر قطر دانه‌ها (میلی‌متر)	۷۵	۲۵
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	۱۵	۴۵
زمان وی‌بی (ثانیه)	۲۵-۱۰	۴۵-۳۰

روسازی بتن غلتکی در مقایسه با دیگر روسازی‌های بتنی و همچنین در مقایسه با روسازی بتن آسفالتی، دارای مزایای مهم و قابل‌تاملی می‌باشد که این مزایا باعث ترغیب بیشتر جهت استفاده از این روسازی در جاده‌ها می‌گردد. از مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به عملکرد سازه‌ای و مقاومت مکانیکی بهتر و تحمل بار ترافیکی بیشتر، کاهش ضخامت لایه‌های زیرین روسازی بتنی در مقایسه با روسازی بتن آسفالتی، عمر مفید بیشتر در مقایسه با عمر روسازی‌های آسفالتی (۴۰ تا ۵۰ سال در مقایسه با ۱۵ تا ۲۰ سال)، مقاومت بیشتر در برابر مواد نفتی و اسیدهای موجود در محوطه‌های صنعتی در مقایسه با روسازی آسفالتی، فراهم ساختن دید بهتر در شب برای استفاده‌کنندگان از روسازی، مقاومت بهتر روسازی بتن غلتکی در مقابل شرایط خاص آب و هوایی،

مواد جایگزین سیمان و سنگدانه تا چه حد می‌تواند در ویژگی‌های بتن غلتکی تاثیرگذار باشد.

## ۲- مواد مصرفی در ساخت بتن غلتکی

### ۲-۱- مواد سیمانی

روش بررسی کیفیت سیمان برای استفاده در بتن غلتکی مشابه روشی است که برای بتن معمولی استفاده می‌شود. انتخاب مواد سیمانی به طور قابل توجهی بر سرعت هیدراسیون و توسعه استحکام تأثیر می‌گذارد. سیمان پرتلند نوع دو به دلیل ویژگی‌های تولید حرارت کم در سنین اولیه و زمان گیرش طولانی‌تر، اغلب نوع سه برای اکثر کاربردهای بتن غلتکی عملی نیست؛ زیرا زمان لازم برای تراکم را کوتاه می‌کند و تکامل حرارت را در سنین اولیه افزایش می‌دهد. سرعت کندتر توسعه مقاومت برخی از سیمان‌ها عموماً منجر به استحکام نهایی بیشتر می‌شود.

استفاده از پوزولان یا سرباره آسیاب‌شده ممکن است بویژه در بتن غلتکی به عنوان پرکننده معدنی و برای خواص سیمانی آن مفید باشد و همچنین درجه‌ای از روانکاری را در طول تراکم فراهم می‌کند. پوزولان مقداری از حجم خمیر سیمان و آب را اشغال می‌کند. خاکستر بادی کلاس F بیشتر به عنوان پوزولان یا پرکننده معدنی برای بتن غلتکی استفاده می‌شود، اما خاکستر بادی کلاس C نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. خاکستر بادی کلاس F به تولید حرارت کمتر در سنین پایین کمک می‌کند و برای جایگزینی سیمان (معمولاً تا ۵۰٪ حجمی) استفاده می‌شود. همچنین این نوع از خاکستر بادی هزینه را کاهش می‌دهد و به عنوان یک پرکننده معدنی برای بهبود کارایی عمل می‌کند و گیرش نهایی را به تاخیر می‌اندازد. آزمایش‌ها باید برای تأیید و ارزیابی مزایای استفاده از پوزولان انجام شود (Engineers, 2000).

### ۲-۲- مصالح سنگی

همانند بتن معمولی، سنگدانه‌ها برای بتن غلتکی باید از نظر کیفیت و درجه‌بندی ارزیابی شوند. سنگدانه برای بتن غلتکی باید مطابق با استانداردهای کیفیت و درجه‌بندی مطابق با ویژگی‌های مورد نظر برای ساختار طراحی باشد. استفاده از سنگدانه‌های

بزرگ‌تر، احتمال جداسازی را در طول حمل و نقل و پخش بتن غلتکی افزایش می‌دهد و آنچنان هزینه ساخت بتن غلتکی را کاهش نمی‌دهد. هنگامی که از بتن غلتکی با محتوای سیمانی کم استفاده می‌شود، مقدار مورد نیاز مصالحی که از ال‌ک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند، بیشتر از بتن معمولی است. در واقع درصد ریزدانه بیشتری برای افزایش محتوای خمیر در مخلوط برای پر کردن فضاهای خالی و کمک به کارایی استفاده می‌شود (Engineers, 2000).

### ۲-۳- آب

کیفیت آب برای تولید بتن غلتکی منطبق بر همان الزامات بتن معمولی کنترل می‌شود (Tayabji et al., 1995). تجربه نشان داده است که آب می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر عملکرد بتن غلتکی داشته باشد؛ به طوری که زمان گیرش و توسعه استحکام می‌تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد (Engineers, 2000).

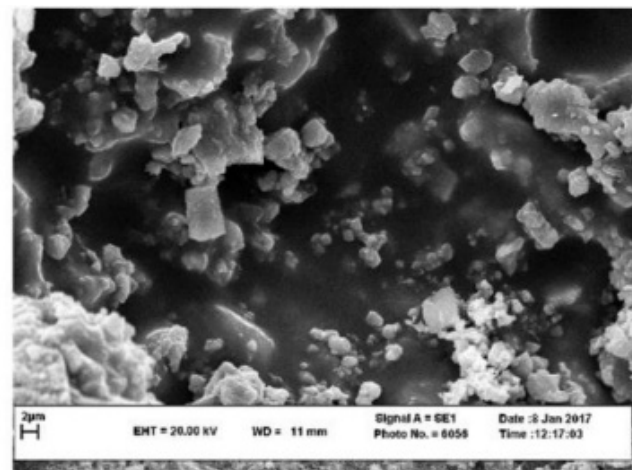
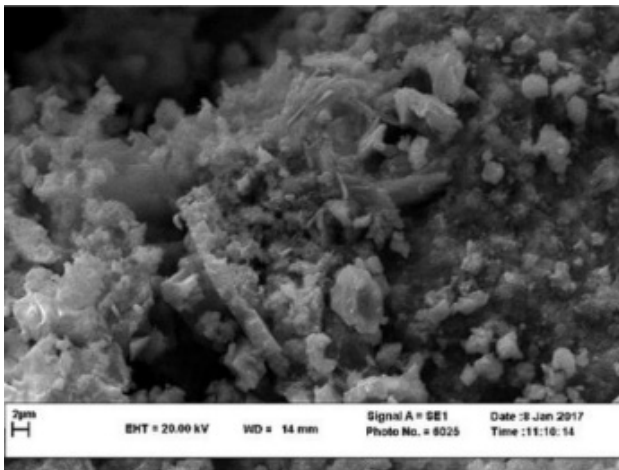
### ۲-۴- اختلاط بتن غلتکی

مخلوط‌های بتن غلتکی باید طوری باشند تا هنگامی که بتن تولیدشده در ضخامت بالا مورد استفاده قرار گیرد، به راحتی و بطور یکنواخت با استفاده از غلتک‌ها و با ویژگی مورد انتظار فشرده شود. روش‌های اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی در ACI 211.3R، ACI 207.5R و ACI 325.10R ارائه شده‌اند (Aghaeipour and Madhkan 2020). طرح اختلاط مورد استفاده برای بتن غلتکی بر اساس معیارهایی نظیر تامین مقاومت خمشی کافی، کارایی مطلوب، قابلیت تراکم، دوام و عدم نیاز به تمهیدات خاص جهت جلوگیری از افزایش حرارت در حین واکنش‌های هیدراسیون سیمان انجام می‌گیرد. از آنجا که تامین مقاومت کافی مخلوط بتن غلتکی عامل اصلی و مهمی در طراحی ضخامت این لایه در کل روسازی است، عیار سیمان مصرفی آن نسبت به بتن‌های حجیم مقدار بیشتری بوده که معمولاً در محدود ۲۱۰ الی ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب بتن می‌باشد (Barati and Karimi and Sahaf, 2022).

سیلیسی و کوارتزی و آنیونی برای سنگدانه آهکی) است. در یک مطالعه اثر قیر امولسیون کاتیونی به عنوان یک افزودنی به بتن غلتکی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. وضعیت روسازی بتن غلتکی را می‌توان با افزودن قیر امولسیون توسعه و بهبود بخشید. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، افزودن قیر امولسیون مقدار منافذ مویرگی را کاهش می‌دهد. به راحتی می‌توان تشخیص داد که منافذ مویرگی توسط قیر امولسیون پر شده است (Dareyni, Moghaddam and Delarami, 2018). در عین حال استفاده از قیر امولسیون در مخلوط بتن غلتکی باعث کاهش واکنش‌های قلیایی سیلیس می‌گردد. مقاومت بتن در برابر واکنش قلیایی سیلیس، می‌تواند به عنوان معیاری برای دوام آن در برابر شرایط محیطی مخرب مانند رطوبت و دمای بالا باشد (Pourjafar et al. 2021).

به حداقل رسانید خسارات ناشی از یخزدگی روسازی بتن غلتکی یکی از مواردی است که در طرح اختلاط بتن غلتکی بایستی مدنظر قرار گیرد. این موضوع تا حدودی با کاهش نفوذپذیری مهیا می‌گردد. برای کاهش نفوذپذیری نیز می‌توان با به حداقل رسانیدن نسبت آب به سیمان و به حداقل رسانیدن درصد فضای خالی بتن غلتکی، رسیدن به این مهم را تسهیل نمود. جهت پرکردن فضای خالی بتن و نیز عملکرد مناسب تحت تراکم با غلتک ارتعاشی، به مقدار بیشتری ریزدانه نیاز است. ضمن اینکه استفاده از افزودنی‌هایی همچون ژل میکروسیلیس یا دوده سیلیس علاوه بر افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی روسازی، بر غلتک‌پذیری بهتر، تراکم‌پذیری و در نتیجه افزایش وزن مخصوص بتن کمک شایانی می‌نماید (Barati and Karimi and Sahaf, 2022).

یکی دیگر از مواردی که باعث کاهش نفوذپذیری مخلوط بتن غلتکی می‌شود، استفاده از قیر امولسیون (کاتیونی برای سنگدانه



شکل ۳. ریزساختار بتن غلتکی همراه با قیر امولسیون (Dareyni, Moghaddam and Delarami, 2018)

روش‌هایی است که برای تعیین رابطه بین مقدار رطوبت و چگالی خاک‌ها یا مخلوط‌های خاک و سنگدانه بکار می‌رود. تجهیزات و میزان انرژی تراکم برای تهیه نمونه‌های آزمایش رطوبت-چگالی در استاندارد ASTM D1557 شرح داده شده است (ASTM, 1991). مقدار مواد سیمانی بر اساس الزامات مقاومت و دوام موردنظر در روسازی تعیین می‌گردد و غالباً بصورت درصدی از جرم کل مصالح خشک (سنگدانه و مواد سیمانی) بیان می‌گردد. مقدار مواد سیمانی بین ۱۰ الی ۱۷ درصد

طرح اختلاط بتن غلتکی روسازی به دو روش کلی بتنی (طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی بتن) و روش خاکی (طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های تراکم خاک) صورت می‌گیرد که روش تراکم خاک از سهولت بیشتری برخوردار است. روش‌هایی که در آن‌ها از آزمایش‌های مشابه تراکم خاک استفاده می‌شود، شامل تعیین رابطه بین چگالی خشک نمونه با مقدار رطوبت آن هستند که از طریق تراکم نمونه‌ها با مقادیر رطوبت مختلف و تعیین چگالی آن‌ها انجام می‌شود. این کار مشابه

جدول ۲. الزامات دانه‌بندی مخلوط روسازی بتن غلتکی

(Barati & Karimi & Sahaf, 2022)

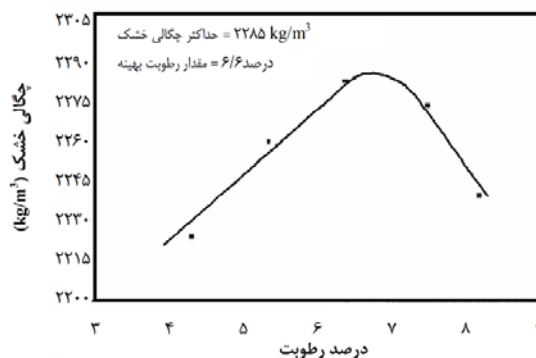
اندازه الک بر حسب میلی‌متر	درصد تجمعی عبوری از الک
۲۵/۴	۱۰۰
۱۹	۱۰۰-۸۳
۱۲,۴	۹۳-۷۲
۹/۵	۸۵-۶۶
۴/۷۵	۶۹-۵۱
۲/۳۸	۵۶-۳۸
۱/۲	۴۶-۲۸
۰/۶	۳۶-۱۸
۰/۳	۲۷-۱۱
۰/۱۵	۱۸-۶
۰/۰۷۵	۸-۲

جرم مصالح خشک در مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی تغییر می‌کند و این مقدار برابر با ۲۰۸ کیلوگرم بر متر مکعب تا ۳۵۶ کیلوگرم بر متر مکعب است. مقدار ریزدانه و درشت‌دانه به نحوی انتخاب می‌شوند که ترکیبی با دانه‌بندی مناسب ایجاد کنند. مقدار بهینه رطوبت مخلوط، مقدار متناظر با نقطه اوج منحنی رطوبت-چگالی است که بستگی به خواص سنگدانه‌های مصرفی و مقدار مواد سیمانی دارد. در مخلوطی که مقدار رطوبت آن کمتر از مقدار بهینه است، به دلیل ایجاد فضای خالی بین سنگدانه‌ها، مقاومت کاهش پیدا می‌کند. همچنین در صورتی که مقدار رطوبت بیشتر از مقدار بهینه باشد نیز به دلیل افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت کاهش پیدا می‌کند. معمولاً چند منحنی رطوبت-چگالی به ازای مقادیر مختلف مواد سیمانی رسم می‌شود و از بین آنها مقدار حداقل مواد سیمانی به نحوی انتخاب می‌گردد که الزامات طرح را ارضا کند (Publication Code 354, 2010).

### ۳- خواص بتن غلتکی سخت‌شده

#### ۳-۱- خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، خمشی و کششی)

مقاومت فشاری یک ویژگی حیاتی برای بتن معمولی با الیاف و یا بدون الیاف است (Auta and Shiwua and Tsado, 2015؛ Kiyanets 2018). بتن غلتکی همانند بتن معمولی نیاز به انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری دارد. این آزمایش با میز ارتعاشی ASTM C1176-92، پروکتور ASTM C1557 و آزمایش‌های هسته زنی ASTM C42 انجام می‌شود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن غلتکی نباید کمتر از ۲۷,۶ مگاپاسکال باشد (ACPA, 2014). مقاومت فشاری بتن غلتکی در درجه اول تحت تأثیر محتوای مواد سیمانی، نوع سیمان، کیفیت و دانه‌بندی سنگدانه‌ها، میزان رطوبت و درجه تراکم مخلوط است. بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته مشخص شد که رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مخلوط بتن غلتکی شبیه به بتن معمولی است (Aghaeipour and Madhkan 2020). در آزمایش‌هایی که در برخی از پروژه‌ها در آمریکا انجام شده، نتایج مقاومت خمشی و کششی بتن حاصل شده که در جدول ۳



شکل ۴. روش تعیین حداکثر چگالی خشک و مقدار رطوبت بهینه در طرح اختلاط بتن غلتکی به روش آزمایش تراکم خاک (Publication Code 354, 2010)

برای طرح اختلاط بایستی گام‌هایی طی شود. در ابتدا درشت‌دانه و ریزدانه خشک را با یکدیگر ترکیب کرده تا دانه‌بندی با محدودیت‌های ذکر شده در جدول ۲ حاصل شود. حدود ۹ کیلوگرم سنگدانه ترکیبی برای هر آزمایش چگالی-رطوبت موردنیاز خواهد بود (Barati & Karimi & Sahaf, 2022).

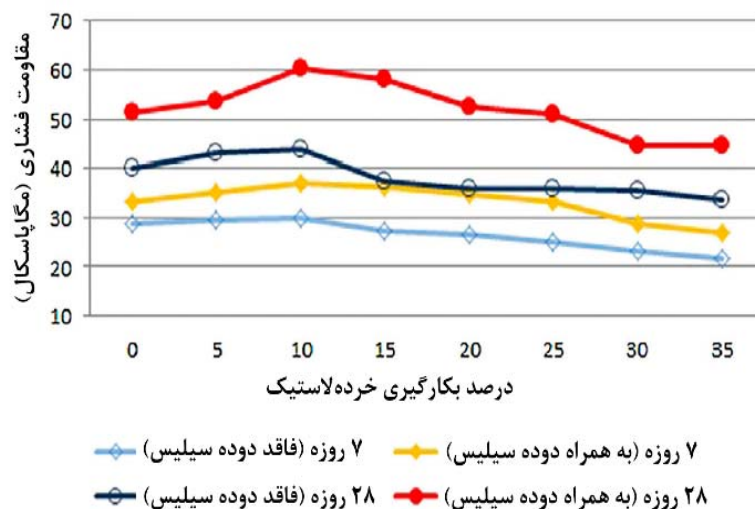
قابل ملاحظه است ( Barati and Karimi and Sahaf, 2022).

تحقیقات فراوانی در خصوص بهبود خواص مکانیکی بر روی بتن غلتکی صورت گرفته است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که خاکستر کوره احتراق<sup>۱</sup> تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی دارد (Chi & Huang, 2014). نتایج یک مطالعه دیگر، افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه را برای محتویات مختلف خرده‌لاستیک ۵ و ۱۰ درصد وزنی سنگدانه بدون دوده سیلیس و

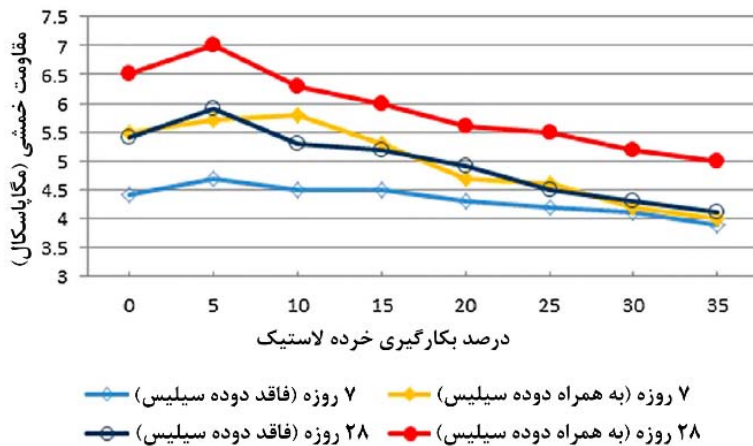
۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سنگدانه به همراه دوده سیلیس نشان داد. با این حال مقاومت فشاری برای سایر نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. به همین ترتیب افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه برای نمونه‌های حاوی ۵ درصد خرده‌لاستیک بدون دوده سیلیس و یا با دوده سیلیس مشاهده شد. اگرچه مقاومت خمشی برای سایر نمونه‌ها کاهش یافت. شکل ۵ و ۶، نمودار تغییرات مقاومت فشاری و خمشی را پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد (Fakhri, 2016).

جدول ۳. نتایج مقاومت خمشی و مقاومت کششی برزیلی در برخی پروژه‌ها در آمریکا (Barati & Karimi & Sahaf, 2022)

پروژه	سن بتن (روز)	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی برزیلی (مگاپاسکال)
پایگاه استورت <sup>۳</sup>	۹۰	۷/۲	-
پایگاه هود <sup>۴</sup>	۷	۴/۷	-
	۲۸	۵/۹	-
پایگاه هاروی <sup>۵</sup>	۷	-	۲/۴
	۲۸	۵/۶	۲/۹
پایگاه کمپیل <sup>۶</sup>	۷	۴/۶	۲/۸
	۲۸	-	-
پایگاه ابردین <sup>۷</sup>	۷	۴	۲/۷
	۲۸	۴/۵	۳/۲



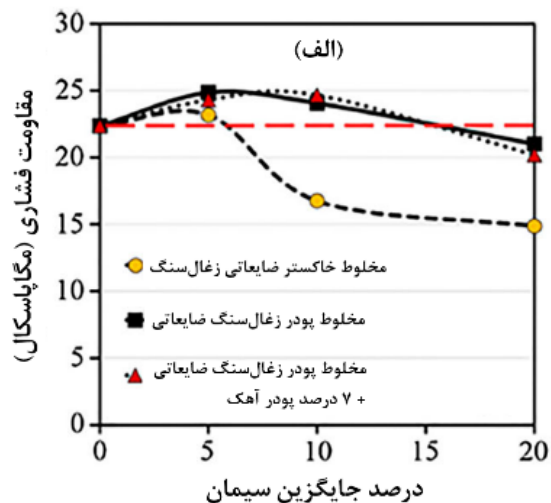
شکل ۵. مقاومت فشاری بتن غلتکی همراه با خرده‌لاستیک پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری (Fakhri, 2016)



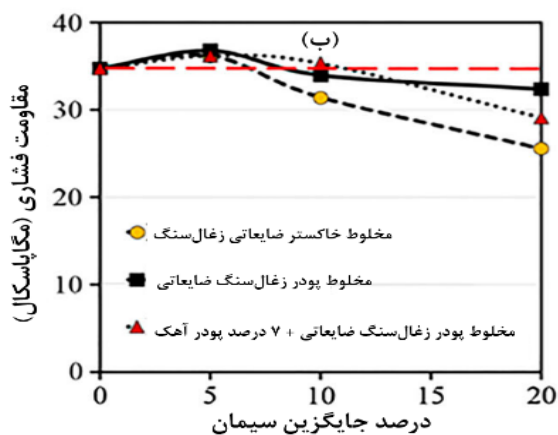
شکل ۶. مقاومت خمشی بتن غلتکی همراه با خرده لاستیک پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری (Fakhri, 2016)

باشد و ممکن است در هیدراتاسیون در سنین اولیه شرکت نکند. به تدریج در سن ۹۰ روز، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی نسبتاً بهبود می‌یابد که نشان می‌دهد پوزولان تاخیر خود را در تولید ژل C-S-H جبران کرده است. همچنین مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۱۲ درصد پوزولان طبیعی، کمتر از بتن ساده است. علاوه بر این، عامل حباب هوا هم مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی را کاهش می‌دهد (Ghahari and Mohammadi and Ramezani pour, 2017). تحقیقات دیگری نشان داده که بتن غلتکی حاوی ۵ تا ۱۰ درصد خاکستر ضایعاتی زغال‌سنگ<sup>۱۱</sup> و ۵ درصد پودر زغال‌سنگ ضایعاتی<sup>۱۱</sup> به عنوان مواد جایگزین سیمان، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی مخلوط را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز افزایش می‌دهد. همچنین این تحقیقات نشان داده که ترکیب ۱۰ درصد خاکستر ضایعاتی زغال‌سنگ و ۵ درصد پودر آهک<sup>۱۲</sup>، خصوصیات مکانیکی را در طول زمان در مقایسه با ۱۰ درصد خاکستر ضایعاتی زغال‌سنگ افزایش داد. شکل‌های ۷ الی ۹ تأثیر محتوای مواد سیمانی مکمل را بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد (Hesami and Modarres and Soltaninejad, 2016).

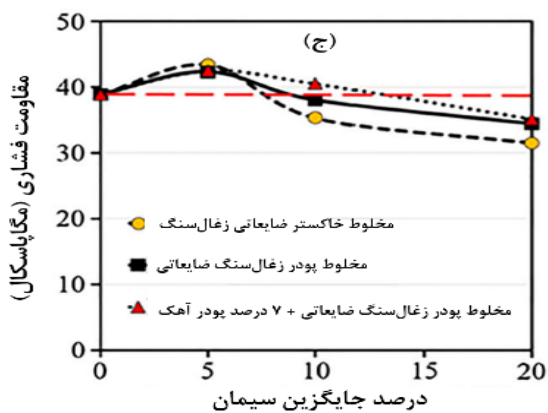
تحقیقات دیگری استفاده از تراشه آسفالتی<sup>۹</sup> در مخلوط بتن غلتکی را مورد بررسی قرار داده است. خرده آسفالت بازیافتی مصالحی است که از طریق بازیافت (آسیاب‌نمودن و یا تراشیدن) آسفالت روسازی‌های مضمحل‌شده بدست می‌آید. مصالح موجود در روسازی‌های مضمحل‌شده می‌تواند با ارزش باشد. وقتی روسازی به پایان دوره سرویس‌دهی خود رسیده باشد، استفاده از تراشه آسفالت از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد و از نظر مسائل زیست‌محیطی و توسعه پایدار ارزشمند است (Ziyari and Moniri and Hajilu, 2017). آزمایش‌ها نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالتی در بتن غلتکی منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشی بتن غلتکی می‌شود، به‌ویژه زمانی که محتوای تراشه آسفالتی بیشتر از ۵۰ درصد باشد. این رفتار با چسبندگی کمتر بین ملات سیمان و ذرات تراشه آسفالتی توضیح داده شده است (Fakhri and Amoosoltani and Aliha, 2017). در تحقیقات دیگر، اثر پوزولان طبیعی و یک عامل جذب کننده هوا بر خواص مکانیکی و دوام بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۳۵ درصد پوزولان طبیعی، کمتر از بتن ساده در سنین اولیه است که می‌تواند به دلیل فعالیت کم پوزولان



شکل ۷. مقاومت فشاری مخلوط روسازی بتن گلتکی در سن ۷ روزه (Hesami and Modarres and Soltaninejad, 2016)



شکل ۸. مقاومت فشاری مخلوط روسازی بتن گلتکی در سن ۲۸ روزه (Hesami and Modarres and Soltaninejad, 2016)



شکل ۹. مقاومت فشاری مخلوط روسازی بتن گلتکی در سن ۹۰ روزه (Hesami and Modarres and Soltaninejad, 2016)

مشابه یا کمی بیشتر از بتن معمولی با محتوای سیمان یکسان باشد (Tayabji et al., 1995). عوامل اصلی موثر بر خواص کشسانی بتن غلتکی شامل سن، استحکام، حجم خمیر و نوع سنگدانه است. بطور کلی برای یک نوع سنگدانه معین، مدول الاستیسیته تابعی از استحکام است (ACI 207.5R-99., 2004). استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی و خرده لاستیک در روسازی بتن غلتکی باعث افزایش جذب انرژی می‌گردد. ضمن اینکه مدول الاستیسیته با افزودن تراشه آسفالتی یا لاستیک کاهش می‌یابد. در مقابل، چقرمگی با افزودن محتوای سیمان افزایش می‌یابد که این موضوع ماهیت شکننده مخلوط‌های بتنی سفت‌تر را نشان می‌دهد (Fakhri and Amoosoltani and Aliha, 2017). همچنین مخلوط بتن غلتکی حاوی سرباره به مقادیر بیشتری آب برای تراکم نیاز دارد و مدول الاستیسیته را نسبت به مخلوط بتن غلتکی فاقد سرباره کاهش می‌دهد. نتیجه آنالیز روی مخلوط بتن غلتکی نشان داده که افزایش مدول الاستیسیته به دلیل دمای بالای فرآیند هیدراتاسیون در مرحله اولیه تسریع شده و در نتیجه تنش‌ها افزایش می‌یابد. مدول الاستیسیته در مرحله اولیه ۴۲ درصد افزایش یافت (Albuquerque et al., 2011)؛ Jaafar et al. 2011). برخی از محققین ناهمسانگردی بتن غلتکی را ثابت کردند و حساسیت استحکام مکانیکی و مدول الاستیک را نسبت به جهت تراکم نشان دادند (Zdiri and Abriak and Ouezdou, 2010).

یک مطالعه نشان داد که مدول الاستیسیته بتن غلتکی به ریشه دوم مقاومت فشاری آن‌ها و حداکثر اندازه سنگدانه آن‌ها مربوط است (Li et al., 2002). همچنین تحقیقاتی در مورد استفاده از الیاف در بتن غلتکی صورت گرفته است. افزودن الیاف می‌تواند مدول الاستیسیته بتن غلتکی را افزایش دهد (Nanni and Johari, 1989) و یا کاهش دهد (Muscalu et al., 2013). همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، نمونه با الیاف فولادی بیشترین مدول الاستیسیته را از خود نشان می‌دهد. نمونه با الیاف اولفین اصلاح‌شده، پلی‌پروپیلن، ترکیب پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن و اولفین اصلاح‌شده اثرات ناچیزی بر مدول الاستیسیته بتن غلتکی نسبت به الیاف فولادی دارند (Calis and Yildizel 2019).

همچنین تحقیقات نشان داده که در مقایسه با بتن معمولی تقویت شده با الیاف فولادی، بتن غلتکی اصلاح‌شده پلیمری تقویت شده با الیاف فولادی مقاومت خمشی بسیار بالایی دارد. این موضوع برای بازسازی روسازی بتنی فرسوده بسیار مطلوب است (Karadelis and Lin 2015). علاوه بر آن، محققان خواص مکانیکی بتن غلتکی به همراه خاکستر بادی با حجم بالا را که به روش حداکثر چگالی طراحی شده است، مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیقات مشاهده شد که مخلوط‌هایی که خاکستر بادی با سیمان جایگزین شود، افزایش محتوای خاکستر بادی باعث کاهش مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی در تمام سنین حتی تا ۱۸۰ روز می‌گردد. ضمن اینکه هنگامی که سنگدانه با خاکستر بادی جایگزین شود، افزایش محتوای خاکستر بادی، مقاومت مخلوط را در تمام سنین در مقایسه با نمونه شاهد افزایش می‌دهد (Mardani-Aghabaglou and Ramyar 2013). در حقیقت استفاده از خاکستر بادی در بتن غلتکی منجر به بهبود قوام مخلوط‌های روسازی بتن غلتکی می‌گردد. این مورد به این دلیل است که مواد پوزولانی در اولین دقایق ساخت بتن هیچ خاصیت سیمانی ندارند و به عنوان پرکننده عمل کرده و قوام را بهبود می‌بخشند (Nili and Zaheri 2011). در تحقیقی دیگر خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی خاکستر پوسته برنج<sup>۱۳</sup> با مواد روسازی آسفالتی اصلی و بازیافتی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از تراشه آسفالتی مقاومت فشاری بتن غلتکی را کاهش می‌دهد. ضمن اینکه جایگزینی بخش درشت‌دانه تراشه آسفالتی مقاومت فشاری بالاتری نسبت به تراشه آسفالتی ریز دارد. به دلیل ماهیت پیشرونده و اکنش پوزولانی، استحکام فشاری، مدول گسیختگی و انعطاف‌پذیری مخلوط‌های بتن غلتکی با افزایش زمان عمل‌آوری بهبود می‌یابد.

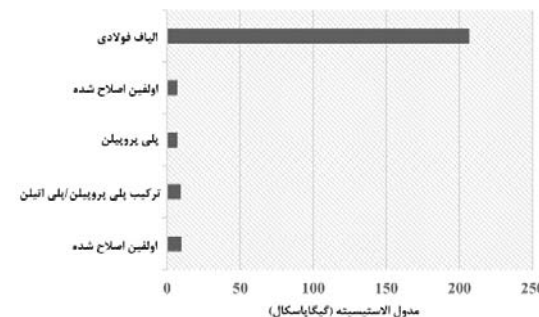
### ۳-۲- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته اغلب روی نمونه‌های بتن غلتکی در پروژه‌های واقعی اندازه‌گیری نشده است. آزمایش‌های محدودی روی نمونه‌های بدست آمده از یک بخش آزمایشی در مقیاس کامل نشان می‌دهد که مدول کشسانی بتن غلتکی ممکن است

ضخامت دال و اساس و بستر خاکی، الگوی ترک خوردگی خستگی در بخش ضخیم تر، بسیار گسترده تر از بخش نازک بود (Wu and Rupnow, 2016). همچنین آزمایش روی عملکرد روسازی بتن غلتکی با درصد‌های متفاوتی از خاکستر بادی<sup>۱۵</sup> بررسی شده است. نتایج نشان داد که روسازی بتن غلتکی با خاکستر بادی (تا ۴۵ درصد خاکستر بادی) نسبت به روسازی بتنی معمولی عملکرد بهتری از نظر خستگی از خود نشان می‌دهد (Sun et al. 1998). در تحقیق دیگری نشان داده شد که افزودن الیاف باعث بهبود خواص مکانیک شکست نسبت به مخلوط بدون الیاف می‌شود که بزرگترین بهبود آن افزایش انرژی شکست است. با توجه به این افزایش در استحکام و خواص مکانیک شکست، در نتیجه مخلوط بتن غلتکی با الیاف باید مقاومت کلی در برابر خستگی روسازی بتن غلتکی را نیز افزایش دهد (LaHucik et al., 2017). همچنین آزمایش‌ها نشان داده‌اند که عملکرد خستگی روسازی بتن غلتکی با جایگزینی جزئی سنگدانه ریز با خرده لاستیک و افزودن نانو سیلیس افزایش می‌یابد. با این حال، استفاده از خاکستر بادی با حجم بالا<sup>۱۶</sup> عملکرد خستگی روسازی بتن غلتکی را کاهش می‌دهد (Adamu et al., 2018).

### ۳-۴- رفتار خزش

به تغییر شکل (کرنش) وابسته به زمان به دلیل بار پایدار گفته می‌شود. خزش به خواص و نسبت مواد وابسته است. همچنین خزش ارتباط نزدیکی با مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن دارد و بنابراین تابعی از سن بتن در زمان بارگذاری است (Engineers, 2000). محققان دریافته‌اند که خواص خزش بالاتر به طور کلی برای کاهش تنش و ایجاد کرنش به دلیل مهار پی، بارهای حرارتی و بیرونی مطلوب است (Tayabji et al., 1995). به طور کلی سنگدانه‌هایی با مدول الاستیسیته پایین، بتن با خزش زیاد تولید می‌کنند. سدهای ساخته شده با بتن غلتکی به دلیل انقباض کمتر با کاهش مدول الاستیسیته و خزش بیشتر، خطر ترک خوردگی کمتری نسبت به بتن معمولی دارند (Berga et al., 2003). آزمایش‌ها نشان داده‌اند که جایگزینی جزئی سنگدانه‌های ریز با خرده لاستیک، باعث افزایش خزش و انقباض ناشی از خشک‌شدگی روسازی بتن غلتکی (به همراه خاکستر



شکل ۱۰. تاثیر الیاف مختلف بر مدول الاستیسیته مخلوط بتن غلتکی (Calis and Yildizel 2019)

### ۳-۳- رفتار خستگی

به شکست ماده در اثر اعمال نیروهای متناوب کمتر از استحکام نهایی و اغلب کمتر از حد تسلیم، خستگی گفته می‌شود. خستگی مواد وقتی اتفاق می‌افتد که ماده تحت تنش‌های تکراری یا نوسانی قرار گیرد که منجر به شکست ناگهانی می‌گردد. خستگی بتن یک فرآیند ترک خوردگی است که منجر به تغییر خواص مواد ماکروسکوپی می‌گردد. نتایج آزمایش‌های خستگی بر روی تیرهای به دست آمده از یک بخش آزمایشی در مقیاس کامل که شامل چهار مخلوط مختلف بتن غلتکی است، نشان می‌دهد که رفتار خستگی بتن غلتکی مشابه رفتار خستگی بتن معمولی است (Tayabji et al., 1995). محققان دریافته‌اند که عمر خستگی مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی تراشه آسفالتی احیاشده کمتر از نمونه بدون تراشه آسفالتی است. علاوه بر آن، جایگزینی سنگدانه درشت با تراشه آسفالتی دارای عمر خستگی بالاتری نسبت به سنگدانه ریز است. همچنین افزودن ۳ درصد خاکستر پوسته برنج، تخلخل را بویژه پس از ۱۲۰ روز عمل‌آوری کاهش داد و مقاومت در برابر خستگی را بهبود بخشید. با این حال، افزودن ۵ درصد خاکستر پوسته برنج منجر به تخلخل بیشتر و عمر خستگی کمتر شد (Modarres and Hosseini, 2014). محققان سه بخش روسازی بتن غلتکی در مقیاس کامل را که بر روی یک پایه سیمانی خاکی تحت آزمایش روسازی تسریع شده<sup>۱۴</sup> ساخته شده بودند، بررسی کردند. این آزمایش در واقع شبیه‌سازی پاسخ سطح روسازی در مقابل بارگذاری‌های چرخ در مدت زمان کوتاه است. در این آزمایش ضخامت روسازی بتن غلتکی از ۱۰۲ میلی‌متر تا ۲۰۳ میلی‌متر متغیر است. با توجه به اثرات ترکیبی

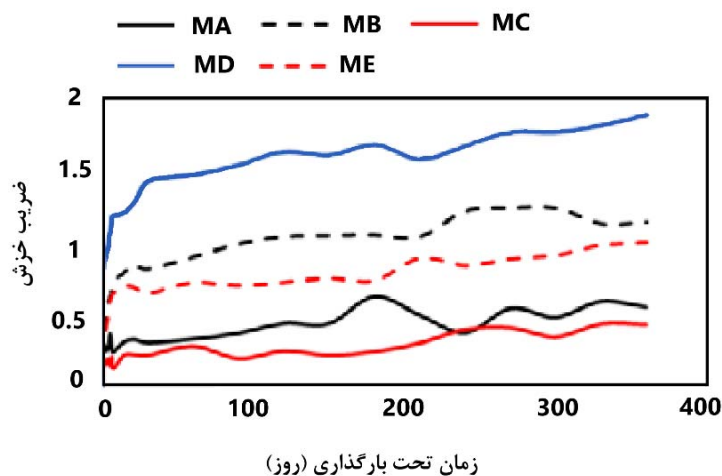
شماره ۴ نشان داده شده است، پنج مخلوط با مقادیر مختلف سیمان، خاکستر بادی، نانو سیلیس، فیلر، ریزدانه و درشت دانه، آب و خرده لاستیک ساخته شده است. نتایج آزمایش خزش در شکل ۱۱ آمده است (Adamu, Mohammed, and Liew 2018).

بادی با حجم بالا یا فاقد خاکستر بادی) می شود. همچنین افزودن نانو سیلیس باعث کاهش خزش و انقباض ناشی از خشک شدن روستازی بتن غلتکی (به همراه خاکستر بادی با حجم بالا یا فاقد خاکستر بادی) می شود. ضمناً کرنش خزشی روستازی بتن غلتکی در هر زمان با استفاده از مقاومت فشاری و سن نمونه به عنوان متغیرهای مستقل قابل پیش بینی است. همانطور که در جدول

جدول ۴. نسبت مخلوط در مقادیر برای یک کیلوگرم بر متر مکعب مخلوط بتن غلتکی برای انجام آزمایش خزش

(Adamu, Mohammed, and Liew 2018)

مخلوط	سیمان	خاکستر بادی	نانو سیلیس	فیلر	ریزدانه	درشت دانه (۱۹ میلی متر)	درشت دانه (۶,۳۵ میلی متر)	آب	خرده لاستیک
MA	۲۶۸/۶۹	۰	۰	۱۰۳/۷۶	۱۱۴۸/۰۵	۴۱۶/۰۳	۴۱۶/۸۵	۹۸/۲۴	۰
MB	۲۶۸/۶۹	۰	۰	۱۰۳/۷۶	۱۰۳۳/۲۵	۴۱۶/۰۳	۴۱۶/۸۵	۹۸/۲۴	۱۱۴/۸۹
MC	۲۶۸/۶۹	۰	۲/۶۹	۱۰۳/۷۶	۱۰۳۳/۲۵	۴۱۶/۰۳	۴۱۶/۸۵	۹۸/۲۴	۱۱۴/۸۹
MD	۱۳۴/۵۸	۱۰۲/۵۴	۰	۱۰۳/۹۴	۱۰۳۵/۰۷	۴۱۵/۷۶	۴۱۷/۵۸	۹۶/۸۷	۱۱۵/۰۸
ME	۱۳۴/۵۸	۱۰۲/۵۴	۲/۳۷	۱۰۳/۹۴	۱۰۳۵/۰۷	۴۱۵/۷۶	۴۱۷/۵۸	۹۶/۸۷	۱۱۵/۰۸



شکل ۱۱. ضریب خزش پنج مخلوط معرفی شده در جدول ۴ (Adamu, Mohammed, and Liew 2018)

### ۳-۵- تغییر حجم

#### ۳-۵-۱- انقباض ناشی از خشک شدن

در مقایسه با بتن معمولی، تغییر حجم ناشی از انقباض خشک شدن در بتن غلتکی به دلیل کاهش محتوای آب، مشابه و در مواردی کمتر است (Tayabji et al., 1995).

انقباض ناشی از خشک شدن در درجه اول توسط محتوای آب مخلوط و تا حدی با میزان سنگدانه ها کنترل می شود.

### ۳-۵-۲- تغییر حجم خود به خود

تغییر حجم خود به خود در درجه اول تابعی از خواص و نسبت مصالح در مخلوط است. مشابه بتن معمولی، تغییر حجم خود به خود را نمی‌توان بدون آزمایش‌های تجربی به طور قابل‌اعتماد پیش‌بینی کرد. این امر بویژه برای مخلوط‌های ساخته‌شده با سیمان، پوزولان و یا سنگدانه غیرمعمول صادق است (Tayabji et al., 1995).

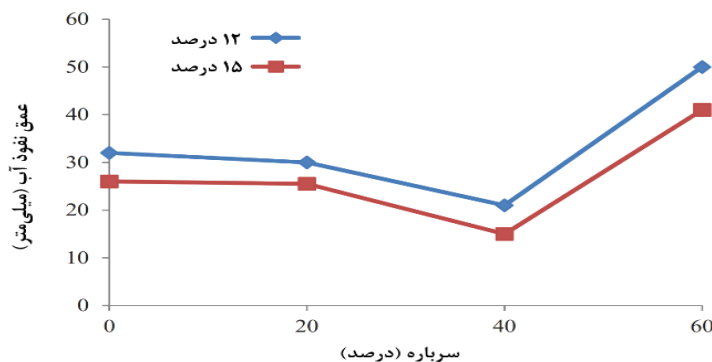
### ۳-۶- خواص حرارتی

خواص حرارتی از جمله گرمای ویژه، رسانایی، ضریب انبساط حرارتی و افزایش دمای بدون تغییر حرارت ناشی از فرآیند هیدراتاسیون، یکی از نگرانی‌های اولیه برای تولید بتن در حجم انبوه است و این موضوع چه برای بتن معمولی و چه بتن غلتکی صادق است. جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی، مقدار مواد واکنش‌پذیر را در مراحل اولیه کاهش می‌دهد. این امر به نوبه خود میزان گرمای تولید شده را کاهش و افزایش مقاومت بتن را به تاخیر می‌اندازد و در نهایت منجر به بهبود دوام می‌شود که هزینه ساخت سد را به حداقل می‌رساند (Abu-Khashaba, Adam, and El-Ashaal, 2014).

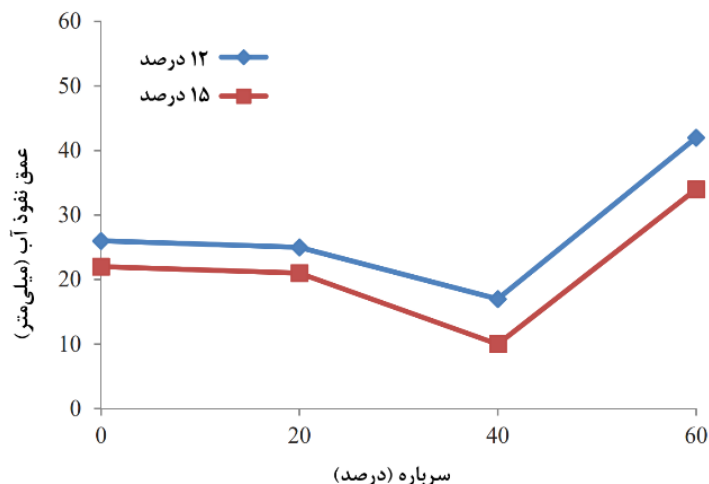
### ۳-۷- نفوذپذیری

نفوذپذیری بتن غلتکی تا حد زیادی به حفره‌های متراکم شده همراه با تخلخل ملات بستگی دارد و بنابراین تقریباً بطور کامل با نسبت مخلوط، روش قرار دادن و درجه تراکم کنترل می‌شود. تحقیقی در مورد اثر پوزولان طبیعی و یک عامل حباب‌زا صورت گرفته که نشان می‌دهد در سن ۹۰ روزگی، نمونه‌های دارای ۱۴

درصد پوزولان طبیعی، عمق نفوذ آب کمتری نسبت به بتن ساده دارند. فعالیت پوزولانی کم، عامل نفوذپذیری بالاتر در سنین پایین است. همچنین هنگامی که از عامل حباب‌زا استفاده می‌شود، عمق نفوذ آب برای هر دو نمونه (با پوزولان و فاقد پوزولان) کاهش می‌یابد (Ghahari and Mohammadi and Ramezaniapour, 2017). تحقیقات نشان داده‌اند که عمق نفوذ آب تحت فشار زمانی که نفوذ آب موازی با لایه‌های ریختن بتن قرار می‌گیرد، همیشه بیشتر از زمانی است که نفوذ آب عمود بر لایه‌های ریختن بتن است که علت آن وجود اتصالات سرد بین لایه‌های تراکم است (Mardani et al., 2013). همچنین تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن خاکستر ضایعاتی زغال‌سنگ تا ۳ درصد به عنوان جایگزینی نسبی سیمان، نفوذپذیری بتن را کاهش داد. ضمن اینکه افزایش بیشتر از ۳ درصد خاکستر ضایعاتی زغال‌سنگ، اثر معکوس بر پارامتر نفوذپذیری داشت. همچنین در مخلوط با مقادیر مختلف پوزولان، نفوذپذیری با افزایش پوزولان کاهش می‌یابد (Rad & Modarres, 2017). همچنین محققان اثر سرباره کوره دانه‌بندی شده<sup>۱۷</sup> را بر دوام روسازی بتن غلتکی بررسی کردند. نتایج نشان دادند که نفوذپذیری بتن با طرح‌های آزمایشی مخلوط بتن غلتکی حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره کوره دانه‌بندی شده کاهش می‌یابد، اما برای محتوای ۶۰ درصد سرباره کوره دانه‌بندی شده افزایش می‌یابد. همچنین افزایش مواد سیمانی از ۱۲ به ۱۵ درصد، کاهش نفوذپذیری بتن را به همراه دارد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمودارهای نفوذ آب در مقابل درصد سرباره مواد سیمانی را نشان می‌دهد (Aghaeipour & Madhkan, 2017).



شکل ۱۲. عمق نفوذ در مقابل درصد سرباره (سن ۹۰ روزه) (Aghaeipour & Madhkan, 2017)



شکل ۱۳. عمق نفوذ در مقابل درصد سرباره (سن ۱۵۰ روزه) (Aghaeipour & Madhkhan, 2017)

### ۳-۸- سایش

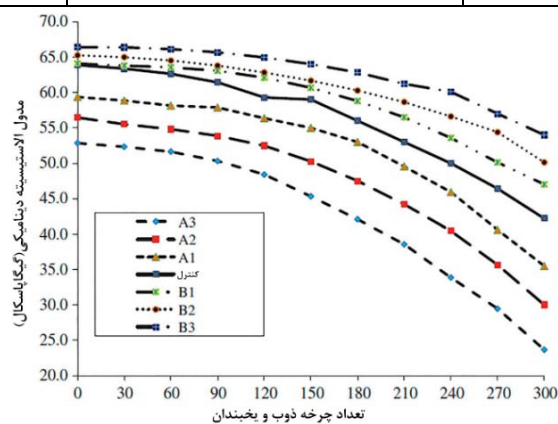
مقاومت در برابر ساییدگی در درجه اول با استحکام فشاری و کیفیت سنگدانه قابل کنترل است. روسازی بتن غلتکی در تأسیسات سنگین مانند محوطه‌های ذخیره‌سازی الوار و مناطق ذخیره‌سازی زغال‌سنگ، فرسودگی کمی در اثر ساییدگی ترافیکی و صنعتی در شرایط سخت نشان داده‌اند (ACI 207.5R-99, 2004). برخی از محققین نشان دادند که مقاومت سایشی بتن غلتکی با سرباره کوره دانه‌بندی شده به عنوان ماده افزودنی معدنی به شدت تحت تأثیر استحکام آن صرف نظر از محتوای سرباره و مقدار شن و ماسه است. مشخص شد که مقاومت سایشی بتن غلتکی با افزایش سن عمل‌آوری برای همه مخلوط‌های بتن غلتکی به همراه خاکستر بادی تهیه‌شده با سه ترکیب از دانه‌های ریز افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که مقاومت سایشی بتن غلتکی با خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی معدنی به شدت تحت تأثیر استحکام آن صرف نظر از محتوای خاکستر بادی و مقدار شن و ماسه است. ضمن اینکه نشان داده شد که مقاومت سایشی بتن غلتکی با افزایش سن نمونه افزایش یافته و عمدتاً به مقاومت فشاری آن بستگی دارد (Rao et al., 2016).

### ۳-۹- دوام روسازی (چرخه ذوب و یخبندان)

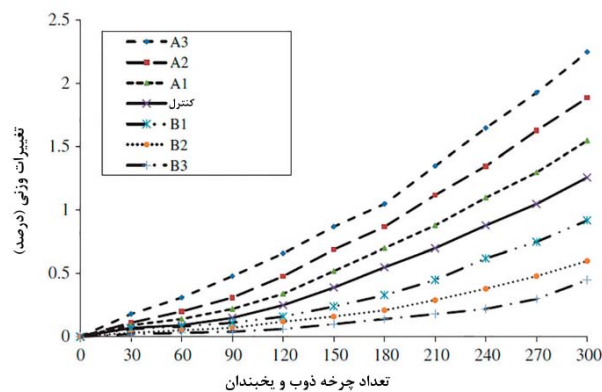
دوام روسازی بتن غلتکی در شرایط ذوب و یخبندان، از ابتدای استفاده از آن در کانادا در سال ۱۹۷۶ برای مهندسیین مورد توجه بوده است (Tayabji et al., 1995). مطالعات نشان داده است که افزودنی‌های حباب‌زا به مخلوط بتن غلتکی، تأثیر مثبتی بر مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخبندان آن دارد (Hazaree, 2007). محققان اثر پوزولان طبیعی و یک عامل حباب‌زا را مورد بررسی قرار داده‌اند. مقدار از دست دادن جرم برای نمونه‌های حاوی پوزولان، زمانی که در معرض محلول ضدیخ قرار می‌گیرد، ۵۱ درصد بیشتر از بتن ساده است. این موضوع به دلیل سرعت کمتر واکنش پوزولان در مقایسه با سیمان است (Ghahari and Mohammadi and Ramezani pour, 2017). آزمایش‌ها نشان داده‌اند که در مقایسه با مخلوط شاهد، خواص چرخه ذوب و یخبندان برای مخلوط‌هایی که خاکستر بادی با سیمان جایگزین می‌شود، افزایش یافته و برای مخلوط‌هایی که خاکستر بادی با سنگدانه جایگزین شده‌اند، کاهش یافته است و این تأثیر هنگامی که سطح جایگزینی خاکستر بادی افزایش یابد، بیشتر خواهد شد (Mardani et al., 2013). جدول ۵، نسبت اختلاط بتن غلتکی و شکل ۱۴ و ۱۵، مدول دینامیکی کشش و درصد تغییر وزن مخلوط‌های بتن غلتکی در طول چرخه‌های ذوب و یخبندان مربوط به این طرح‌های مخلوط را نشان می‌دهد.

جدول ۵. نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی مورد مطالعه (Mardani et al., 2013)

ردیف	مخلوط	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	خاکستر بادی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱	نمونه کنترلی	۲۵۰	۰
۲	A1	۲۰۰	۵۰
۳	A2	۱۵۰	۱۰۰
۴	A3	۱۰۰	۱۵۰
۵	B1	۲۵۰	۵۰
۶	B2	۲۵۰	۱۰۰
۷	B3	۲۵۰	۱۵۰



شکل ۱۴. تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی در طول چرخه‌های ذوب-یخبندان مخلوط‌های بتن غلتکی (Mardani et al., 2013)

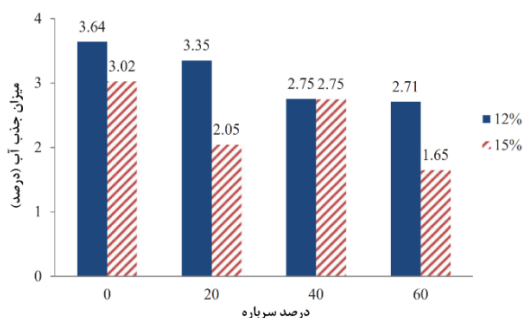


شکل ۱۵. درصد تغییرات وزنی نمونه‌های بتن غلتکی در طول چرخه ذوب - انجماد (Mardani et al., 2013)

نتایج نشان داده‌اند که با افزایش دوره انجماد تا ۱۸ ساعت، سرعت پوسته پوسته شدن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه جرم ذرات خرد شده نشان داد که یک دوره

آزمایش‌ها بر روی مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن سطحی بتن غلتکی در مقابل مواد شیمیایی یخزدا برای شرایط چرخه ذوب و انجماد با دوره انجماد طولانی و کوتاه بررسی شده است.

کاهش در نمونه‌های دارای دود سیلیس بیشتر مشهود است (Fakhri, 2016). آزمایش‌ها نشان داده‌اند که حداکثر جذب آب برای مخلوط بتن غلتکی با ۸۵ درصد خاکستر بادی (درصد وزنی سیمان)، ۲،۱۱ درصد است. همچنین جذب آب با کاهش حفره‌های نفوذپذیر کاهش می‌یابد (Yerramala and Babu, 2011). به طور کلی مشخص شد که جایگزینی سرباره به جای سیمان، منجر به کاهش جذب آب می‌گردد. این کاهش جذب آب با افزایش مواد سیمانی از ۱۲ درصد به ۱۵ درصد، افزایش می‌یابد. جذب آب در تمام طرح‌های مخلوط مورد بررسی کمتر از ۴٪ بود. شکل ۱۶، نمودار جذب آب در مقابل محتوای سرباره را برای ۲ درصد مختلف از مواد سیمانی نشان می‌دهد (Aghaeipour & Madhkhani, 2017).



شکل ۱۶. درصد جذب آب در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۱۲ و ۱۵ درصد مواد سیمانی (Aghaeipour & Madhkhani, 2017)

### ۳-۱۱- خواص سطحی روسازی بتن غلتکی

یکی از محدودیت‌های روسازی بتن غلتکی مربوط به کیفیت سطح روسازی پس از ساخت است. روسازی بتن غلتکی سطحی ناهموار دارد (Delatte, Amer, and Storey, 2003). در طرح بتن اندازه و نوع سنگدانه‌ها نقش عمده‌ای دارد. هرچه حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌های بتن کوچکتر باشد، سطح حاصل بافت بهتر و یکنواخت‌تری خواهد داشت (Piggott, 1999). استفاده از سنگدانه با حداکثر اندازه اسمی بزرگتر، سبب اقتصادی‌تر شدن طرح می‌گردد؛ چراکه با افزایش حداکثر اندازه اسمی، میزان فضای خالی بین سنگدانه‌ها کاهش یافته و لذا مقدار خمیر سیمان کمتری مورد نیاز خواهد بود. در این راستا در سدها

انجماد ۱۸ ساعته، مطابق با ASTM C672، شرایط شدیدی را ایجاد می‌کند که از شرایط واقعی دور است. این موضوع نشان می‌دهد که مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن در مقابل مواد شیمیایی یخ‌زدا را می‌توان با انتخاب مناسب دوره انجماد در چرخه‌های ذوب-انجماد بهتر ارزیابی کرد (Nili and Zaheri, 2011). آزمایش‌ها نشان داده‌اند که اضافه کردن پودر شیشه<sup>۱۸</sup> در مخلوط بتن غلتکی، تأثیر مثبتی بر خواص دوام (مقاومت در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب، مقاومت فشاری و خمشی) دارد. تخلخل و حجم حفره‌های نفوذپذیر در مخلوط بتن غلتکی سخت شده را می‌توان هنگام طراحی مخلوط با پودر شیشه کاهش داد (Omran et al., 2017). آزمایش‌ها همچنین نشان داده که استفاده از دوده سیلیکا، یک افزودنی معدنی موثر در افزایش دوام در برابر یخ‌زدگی مخلوط روسازی بتن غلتکی است (Vahedifard, Nili, and Meehan, 2010). آزمایش‌های دیگر نشان داده‌اند که اگرچه استفاده از عوامل حباب‌زا در بتن غلتکی باعث کاهش استحکام فشاری و کششی و افزایش نفوذپذیری آب شد، اما در برابر رسوب‌گذاری نمک در چرخه‌های انجماد-ذوب عملکرد خوبی داشته است (Ramezani-pour et al., 2017). همچنین تحقیقات نشان داده که اگر از قیر امولسیون کاتیونی به عنوان افزودنی برابر یا بیشتر از ۴ درصد در مخلوط بتن غلتکی استفاده شود، می‌توان انتظار داشت که ویژگی‌های دوام آن بهبود یابد (Dareyni, 2018). (Moghaddam and Delarami, 2018)

### ۳-۱۰- جذب آب

محققان اثرات خاکستر بستر سیال در گردش را بر روی خواص بتن غلتکی بررسی کردند. این نوع خاکستر، به دلیل مقادیر بالای اکسید کلسیم (CaO)، تری اکسید گوگرد (SO<sub>3</sub>) و اتلاف در هنگام اشتعال، می‌تواند جذب آب را افزایش داده و به طور موثر جذب سطح اولیه را کاهش دهد (Chi and Huang, 2014). همچنین نشان داده شد که جایگزینی شن و ماسه با خرده‌لاستیک باعث کاهش جذب آب می‌شود و این

آسفالتی است (ACI 207.5R-11, 2011). نتایج مطالعه بر روی روسازی بتن غلتکی در استرالیا نشان داد که این روسازی‌ها نسبت به جاده‌ی آسفالتی که نیاز به نوسازی دارد، وضعیت بهتری دارند. در این تحقیق شواهد حاکی از آن است که با کسب تجربه بیشتر در اجرای این نوع از روسازی، کیفیت آن‌ها قابل بهبود است (Naik et al., 2001).

با توجه به حجیم بودن آن و ضخامت‌های ۳۰ سانتی‌متری لایه‌ها، حداکثر اندازه اسمی مناسب و بهینه سنگدانه ۷۶ میلی‌متر می‌باشد. درحالی که در روسازی راه و کف محوطه‌ها به علت کمی ضخامت لایه‌های اجرایی، حداکثر اندازه اسمی نباید از ۱۹ میلی‌متر تجاوز نماید تا یک سطح نسبتاً صاف و هموار حاصل آید (Barati & Karimi & Sahaf, 2022).

در استرالیا آزمایش‌هایی برای تعیین اصطکاک سطحی روسازی بتن غلتکی انجام شده است. نتایج ضریب نیروی جانبی نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده برای این آزمایش به طور قابل توجهی کمتر از مقادیر این پارامتر خاص برای روسازی‌های

جدول ۶. خلاصه شاخص‌های مورد بررسی در روسازی بتن غلتکی و مقایسه آن با بتن معمولی پرتلند

شاخص	بتن معمولی	بتن غلتکی	منبع
دانه‌بندی	دانه‌بندی خوب	دانه‌بندی خوب و یا متراکم	Harrington et al., 2010
مقدار مصالح سنگی	۶۰ الی ۷۵ درصد حجم کل مصالح	۷۵ الی ۸۵ درصد حجم کل مصالح	Barati and Karimi and Sahaf, 2022
کارایی و روانی	کارایی پایین با اسلامپ حدود ۵ سانتی‌متر	کارایی بسیار پایین با اسلامپ صفر	Harrington et al., 2010
نحوه اجرا	اجرا با ماشین‌های مجهز به قالب متحرک <sup>۱۹</sup> و تراکم با ارتعاش	فینیش‌های مخصوص با قدرت تراکم بالا و غلتک‌های چرخ فولادی و چرخ لاستیکی	Harrington et al., 2010
پرداخت سطح روسازی	پرداخت قبل از گیرش نهایی و با استفاده از تجهیزات مکانیکی	عدم نیاز به پرداخت با توجه به بافت باز آن (در صورت استفاده از دانه‌بندی ریزتر نیاز به عملیات الماس تراشی سطح <sup>۲۰</sup> )	Hazaree 2007 Harrington et al., 2010
مقاومت فشاری و خمشی	نسبتاً کم	نسبتاً بالا	Hazaree 2007

#### ۴- نتیجه‌گیری

مربوط به مکانیک شکست در حالت‌های مختلف بارگذاری (حالت اول و دوم و سوم و ترکیبی از حالات مختلف) و چقرمگی شکست، از اهمیت بالایی برخوردار است که مقدمه آن، شناخت مباحث ذکر شده است. بطور کلی مزایای استفاده از بتن غلتکی را می‌توان به عناوین ادامه خلاصه کرد.

در این مقاله سعی شد تا مروری بر ویژگی‌های بتن غلتکی و اکثر کارهای صورت گرفته بر روی آن مورد بحث قرار گیرد. ضمن اینکه تمرکز این تحقیق بر یکی از کاربردهای مهم این نوع مخلوط یعنی در روسازی راه بود. هدف افزایش آگاهی از بهره‌گیری از بتن غلتکی از نظر خواص مکانیکی، دوام، سرعت بالای اجرا و عملکرد اقتصادی آن بود. در عین حال مباحث

- انقباض، خزش، مدول الاستیسیته، خواص حرارتی و رفتار خستگی بتن غلتکی مشابه با بتن پرتلند معمولی است. سنگدانه با مدول الاستیسیته پایین، بتن با خزش زیاد تولید می‌کند و خواص خزشی بالاتر عموماً برای کاهش تنش و ایجاد کرنش به دلیل محدودیت پی، بارهای حرارتی و خارجی مطلوب است.

- مخلوط بتن غلتکی در چرخه‌های انجماد و ذوب به خوبی عمل کرده‌اند. همچنین افزودنی‌های حباب‌زا تأثیر مثبتی بر مقاومت چرخه ذوب و انجماد دارند. همچنین استفاده از افزودنی‌هایی همچون قیر امولسیون در مخلوط بتن غلتکی می‌تواند به بهبود دوام کمک شایانی کند.

- اساسا روسازی بتن غلتکی سطحی ناهموار دارد. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه کوچکتر، سطح بافت بهتر و یکنواخت‌تری را در پی خواهد داشت. بر این اساس حداکثر اندازه اسمی در روسازی بتن غلتکی به ۱۹ میلی‌متر محدود می‌گردد.

- تأثیر فوق العاده استفاده از بتن غلتکی در خصوص خواص مکانیکی، دوام، سرعت بالای اجرا و عملکرد اقتصادی آن است. بتن غلتکی برای سال‌ها در کاربردهای مختلفی از جمله سدها، محوطه‌های ذخیره‌سازی الوار، جاده‌های مخصوص حمل بار با بار محوری بالا، اسکله‌های بارگیری، تأسیسات بندری و پارکینگ‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

- عملکرد سازه‌ای و مقاومت مکانیکی بهتر و تحمل بار ترافیکی بیشتر و عدم نیاز به فولاد مسلح‌کننده و آرماتورهای دوخت از ویژگی‌های روسازی بتن غلتکی است.

- کاهش ضخامت لایه‌های زیرین در مقایسه با روسازی آسفالتی و همچنین عمر مفید بیشتر در مقایسه با عمر روسازی‌های آسفالتی از دیگر مزیت‌های این نوع از روسازی است.

- استفاده از مواد سیمانی تکمیلی در دسترس، مانند پوزولان و سرباره برای جایگزینی بخشی از سیمان، می‌تواند تأثیر مثبتی بر هزینه مواد، خواص مکانیکی و دوام بتن غلتکی داشته باشد.

#### ۵- پی‌نوشت‌ها

1. Roller Compacted Concrete Pavement (Rccp)
2. Pumping
3. Stewart
4. Hood
5. Harvey
6. Campbell
7. Aberdeen
8. Circulating fluidized Bed Combustion (Cfbc)
9. Reclaimed Asphalt Pavement (Rap)
10. Coal Waste Ash (Cwa)
11. Coal Waste Powder (Cwp)
12. Limestone Powder (Lp)
13. Rice Husk Ash (Rha)
14. Accelerated Pavement Testing (Apt)
15. Fly Ash (Fa)
16. High Volume Fly Ash (Hvfa)
17. Ground Granulated Blast Furnace Slag (Ggbfs)
18. Glass Powder (Gp)
19. Slipform Paving Machine
20. Diamond Grinding

## ۶- مراجع

آسفالتی. نهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین‌آلات، تهران.

راهنمای طراحی و اجرای بتن گلتکی در روسازی راه‌های کشور. (۱۳۸۸). نشریه شماره ۳۵۴، معاونت برنامه‌ریزی و راهبردی رییس جمهور.

براتی، روح‌الله، کریمی گوغری، محمد، صحاف، سیدعلی (۱۴۰۱). روسازی بتن گلتکی. نشر نوآور، چاپ اول.

زبیری، حسن. منیری، علی. حاجیلو، مجتبی. (۱۳۹۶). مروری بر استفاده از تراشه آسفالتی بازیافتی بر ترک‌خوردگی مخلوط‌های

n pavement. *Journal of Cleaner Production*, 129, 521–530.

-Fakhri. M., Amoosoltani. E., & Aliha. M. R. M. (2017). Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Engineering Fracture Mechanics*, 180, 43–59.

-Ghahari. S. A., Mohammadi. A., & Ramezaniannour. A. A. (2017). Performance assessment of natural pozzolan roller compacted concrete pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 82–90.

-Holder, R. (1984). Roller compacted concrete pavement tactical equipment hardstand, line item 434. Contract No. DACA83-C-0188, Fort Hood, Tex., Fort Worth District, *Corps of Engineers*.

-Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design (2nd ed, 14–16). Upper Saddle River, *Pearson Prentice Hall*.

-Husein Malkawi, A. I., Mutasher, S. A., & Qiu, T. J. (2003). Thermal-structural modeling and temperature control of roller compacted concrete gravity dam. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17(4), 177–187.

-Kagata. (1998). Retarder application to longitudinal roller compacted in concrete pavement joints, 9<sup>th</sup> *International Symposium in Concrete Roads*, Portugal.

-Khayat, K. H., & Libre, N. A. (2014). Roller compacted concrete: field evaluation and mixture optimization (No. NUTC R363), *Missouri University of Science and Technology*, Center for Transportation Infrastructure and Safety.

-Larsen, J. L. (1986a). Roller compacted concrete pavement for marine terminals. Ports'86, Proceedings of a specialty conference in innovations in port engineering and development in the 1990s, ASCE, Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, *Committee on Ports & Harbors*, New York, NY., 144–158.

-Larsen, J. L. (1986b). Roller compacted concrete pavement design practices for intermodal freight terminals at the port of Tacoma. State of the art report, Sverdrup & Parcel and Associates, Inc., Bellevue, Washington, TRB, No. 4, *Facing the Challenge*.

-Logie, C. V., & Oliverson, J. E. (1987). Burlington northern railroad intermodal hub facility. *Concrete International*, 9(2), 37–41.

-Abrams, J. M. (1986). Roller compacted concrete pavement at Portland international airport. Transportation Research Record 1062, *Transportation Research Board*, Washington, 20–24.

-Abrams, J. M., & Jackshaw, J. L. (1987). An airport Apron and a county road. *Concrete International: Design & Construction*, 9(2), 30–36.

-ACI 207.5R-99. (2004). Roller compacted mass concrete. ACI Manual of Concrete Practice, *Author*, 47.

-ACI 325.10R-99. (2004). State of the art report on roller compacted concrete pavement. *ACI Manual of Concrete Practice, Author*, 32.

-Aghaeinour. A., & Madhkan. M. (2020). Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP)—a review. *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 1775–1798.

-Anderson, R. (1986). Roller compacted concrete pavements: Physical properties. Sweden, *Swedish Cement and Concrete Research Institute*. No. Ra 3:86.

-Carrascón, S., Díaz, J., & Josa, A. (1990). RCC Application in low-volume roads in Spain. 6<sup>o</sup> simposio internacional sobre Carreteras de Hormigó. *Madrid-out*, 93–102.

-Chi. M., & Huang. R. (2014). Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 148–156.

-Cortez, E. R., & Eaton, R. A. (1991). Environmental monitoring and performance evaluation of roller- compacted concrete pavement: Conley Terminal, Boston, Massachusetts (No. CRREL-SR-91-25). *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*.

-Dareyni M, Moghaddam AM, Delarami A. (2018). Effect of cationic asphalt emulsion as an admixture on transport properties of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 724–733.

-Engineers, U. A. C. O. (2000, 15 January). Roller-compacted concrete. EM 1110-2-2006. Washington, DC, *Department of the Army*.

-Fakhri. M. (2016). The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete

- Albuquerque. M. C., Balbo. J. T., Sansone. E. C., & Pinto. P. C. (2011). Fracture characterization of roller compacted concrete mixtures with blast furnace slag and industrial sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(4), 244–251.
- Jaafar. M. S., Noorzai. J., Abdulrazeg. A. A., Mohammed. T. A., & Khanehzaei. P. (2011). A spatial FEM model of thermal and mechanical action in RCC dam. *Structural Longevity*, 5(3), 147–155.
- Zdiri. M., Abriak. N. E., Ouezdou. M. B., & Neji. J. (2010). Study of the anisotropy of the roller compacted concrete (RCC) for pavement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 4(1), 45–49.
- Li. O., Zhang. F., Zhang. W., & Yang. J. (2002). Fracture and tension properties of roller compacted concrete cores in uniaxial tension. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(5), 366–373. (Li et al. 2002)
- Auta SM, Shiwua AJ, Tsado TY (2015). Compressive strength of concrete with millet husk ash (MHA) as a partial replacement for cement. *Magazine of Civil Engineering*, 59(7), 74–79.
- Kivanets AV (2018). Concrete with recycled polyethylene terephthalate fiber (Бетон с добавлением фибры из переработанного полиэтилентерефталата). *Magazine of Civil Engineering*, 8(84), 109–118.
- ACPA (American Concrete Pavement Association) (2014). Roller-Compacted Concrete Guide Specification. 1–29. <http://www.acpa.org/wcontent/uploads/2014/11/ACPA-Roller-Compacted-Concrete-Guide-Specification-Version-1.2.pdf>. Downloaded on 01-07-2019.
- Modarres. A., & Hosseini. Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*, 64, 227–236.
- Wu. Z., Mahdi. M., & Runnow. T. D. (2016). Accelerated pavement testing of thin RCC over soil cement pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(3), 159–168.
- Sun. W., Liu. J., Qin. H., Zhang. Y., Jin. Z., & Oian. M. (1998). Fatigue performance and equations of roller compacted concrete with fly ash. *Cement and concrete research*, 28(2), 309–315.
- Jachucik. J., Dahal. S., Roesler. J., & Amirkhanian. A. N. (2017). Mechanical properties of roller-compact concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 135, 440–446.
- Adamu. M., Mohammed. B. S., Shafia. N., & Shahir Liew. M. (2018). Effect of crumb rubber and nano silica on the fatigue performance of roller compacted concrete pavement. *Cogent Engineering*, 5(1), 1436027.
- Mc Cormac, Jr., W. N. (1985). Engineer Technical Letter, 1110-1-126, Chief, Engineering Division, Directorate of Engineers and Construction, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineer, Washington, D.C.
- Pouriafar. S. V., Moghaddam. A. M., Pouriafar. S. S., & Afsharirad. M. (2021). Investigating the effect of cationic emulsified bitumen as an admixture of roller-compact concrete pavement on the progress of alkali-silica reaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 250, 107759.
- Shin, K. J., & Carboneau, N. (2010). The Indiana local technical assistance program roller compacted concrete pavement manual for local government agencies.
- Tayabji, S. D., Sherman, T. W., Keifer, O., Nanni, A., Piggott, R. W., Pittman, D., Scott, J. A. (1995). State-of-the-art report on roller compact concrete pavements. (No. ACI325.10R-95).
- Williams, S. (2014). Construction of roller compacted concrete pavement in the Fayetteville Shale Play area, Arkansas. Transportation research Record. *Journal of the Transportation Research Board*, 2408, 47–54.
- Zdiri, M., Abriak, N. E., Ouezdou, M. B., Loulizi, A., & Neji, J. (2009a). Numerical modeling of a roller compacted concrete pavement under Vehicular loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2(5), 188–195.
- Zulkifli, A. R., Hamid, A. R. A., Arshad, M. F., & Ahmad, J. (2015). Construction of roller compacted concrete dam: A Case Study at Batu Hampar Dam.
- Hesami. S., Modarres. A., Soltaninejad. M., & Madani. H. (2016). Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Construction and Building Materials*, 111, 625–636.
- Karadelis. J. N., & Lin. Y. (2015). Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced roller-compact polymer modified concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 498–505.
- Mardani-Aghabaglou. A., & Ramvar. K. (2013). Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Construction and Building Materials*, 38, 356–364.
- Rao. M., Yang. H., Lin. Y., Li. J., & Shi. Y. (2016). Influence of maximum aggregate sizes on the performance of RCC. *Construction and Building Materials*, 115, 42–47.
- Fakhri. M., & Amoosoltani. F. (2017). The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 137, 470–484.

- Vahedifard, F., Nili, M., & Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2528-2535.
- Ramezaniapour, A. A., Mohammadi, A., Dehkordi, E. R., & Chenar, Q. B. (2017). Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavements in cold regions. *Construction and Building Materials*, 146, 260-266.
- Chi, M., & Huang, R. (2014). Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 148-156.
- Fakhri, M. (2016). The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 129, 521-530.
- Yerramala, A., & Babu, K. G. (2011). Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(10), 1057-1062.
- Delatte, N., Amer, N., & Storey, C. (2003). Improved management of RCC pavement technology. *UTCA Report*, 1231, 54.
- Piggott, R. W. (1999). Roller-compacted concrete pavements: A Study of Long Term Performance. Portland Cement Concrete, *Research & Development RP366.01P*.
- ACI 207.5R-11. (2011). Report on Roller Compacted Mass Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, USA, 71.
- Naik, T. R., Chun, Y. M., Kraus, R. N., Singh, S. S., Pennock, L. L. C., & Ramme, B. W. (2001). Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 6(4), 154-165.
- Harrington, D., Abdo, F., Cevlan, H., Adaska, W., Hazaree, C., & Bektas, F. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements.
- American Society for Testing and Materials (1991). Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. *ASTM D1557*.
- Nanni A. Johari A (1989). RCC pavement reinforced with steel fibers. *Concrete International*, 11(3), 64-69.
- Muscalu MT, Andrei R, Budescu M, Taranu N, Florescu F (2013). Use of Recycled Materials in the Construction of Roller Compacted Concrete (RCC) Pavements. *Advanced Materials Research*, 649, 262-265.
- Calis, G., & Yıldız, S. A. (2019). Investigation of roller compacted concrete: Literature review. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 10(3), 63-74.
- Berga, L., Buil, J. M., Jofré, C., & Chonggang, S. (Eds.). (2003). RCC dams-roller compacted concrete dams: Proceedings of the IV international symposium on roller compacted concrete dams (2 Vol set.). *Madrid: CRC Press*.
- Adamu, M., Mohammed, B. S., & Liew, M. S. (2018). Effect of crumb rubber and nano silica on the creep and drying shrinkage of roller compacted concrete pavement. *International Journal*, 15(47), 58-65.
- Abu-Khashaba, M. I., Adam, I., & El-Ashaal, A. (2014). Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam. *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), 131-142.
- Mardani-Aghabaglou, A., Andic-Cakir, Ö., & Ramvar, K. (2013). Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement and Concrete Composites*, 37, 259-266.
- Rad, S. A. M., & Modarres, A. (2017). Durability properties of non-air entrained roller compacted concrete pavement containing coal waste ash in presence of de-icing salts. *Cold Regions Science and Technology*, 137, 48-59.
- Aghaeinour, A., & Madhkhan, M. (2017). Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. *Construction and Building Materials*, 141, 533-541.
- Hazaree, C. V. (2007). Transport properties and freeze-thaw resistance of roller compacted concrete (RCC) for pavement applications. MS Thesis, *Iowa State University*.
- Nili, M., & Zaheri, M. (2011). Deicer saltscaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1671-1676.
- Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A., & Gagne, R. (2017). Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study. *Construction and Building Materials*, 133, 450-458.

# **A Review of Mechanical Properties and Durability of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)**

*Mahmoud Ameri, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Neda Kamboozia, Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mohammad Reza Khakbaz, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*E-mail: [nkamboozia@iust.ac.ir](mailto:nkamboozia@iust.ac.ir)*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

Roller compacted concrete (RCC) is a type of zero slump concrete produced from the same materials with normal concrete. Use of RCC has substantially increased in the last decades especially for pavement applications. It has a low construction cost and can be done quickly compared to asphalt pavement. It is widely constructed in roads carrying heavy loads in low speed. Also in recent years, the use of RCC in highways and inner-city streets has also increased. Roller compacted concrete pavement (RCCP) has a competitive advantage over high-performance asphalt pavements in terms of high compressive strength, good durability, low maintenance cost and longer service life. In this article at first, the materials used in the production of RCC, including cement, stone materials, water, and finally the method of mixing plan are discussed. Then to examine the properties of RCC with a focus on RCCP including mechanical properties, modulus of elasticity, fatigue and creep behavior, volume change, thermal properties, permeability and water absorption, wear, durability of pavement in the cycle of melting and freezing and surface properties of RCC been paid. The purpose of this article is to know the different characteristics of RCC and the research done in the mixture design to achieve a mixture with greater strength and durability.

**Keywords:** Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP), Mechanical Properties, Durability